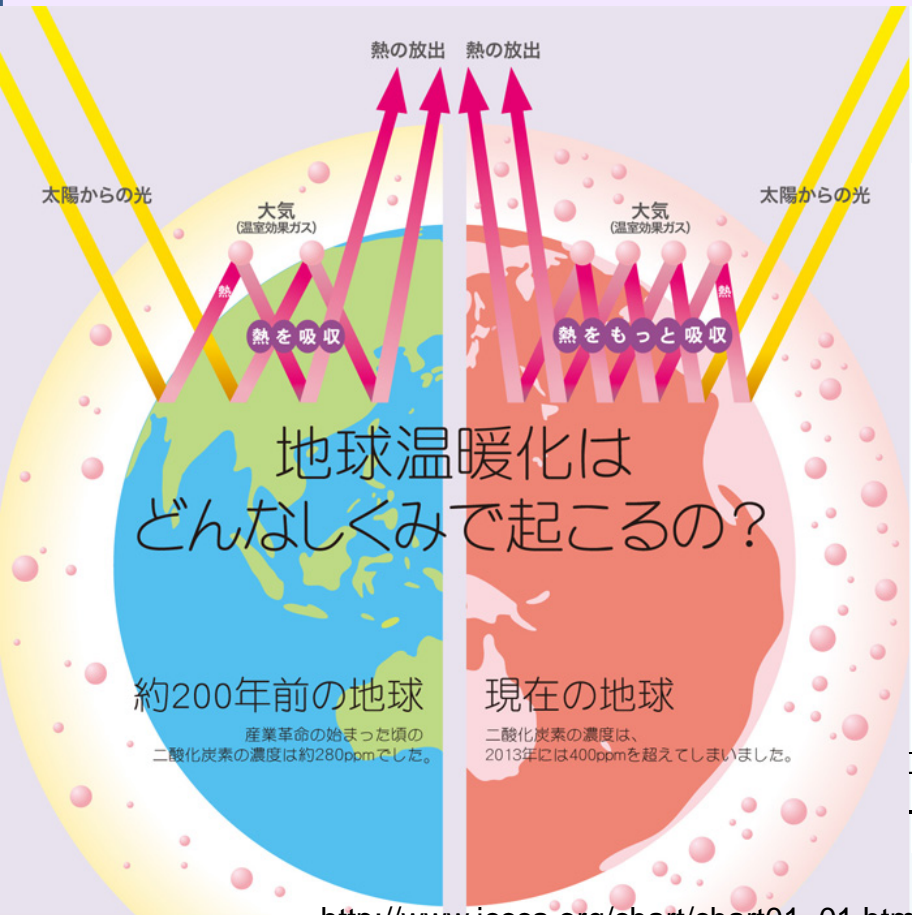


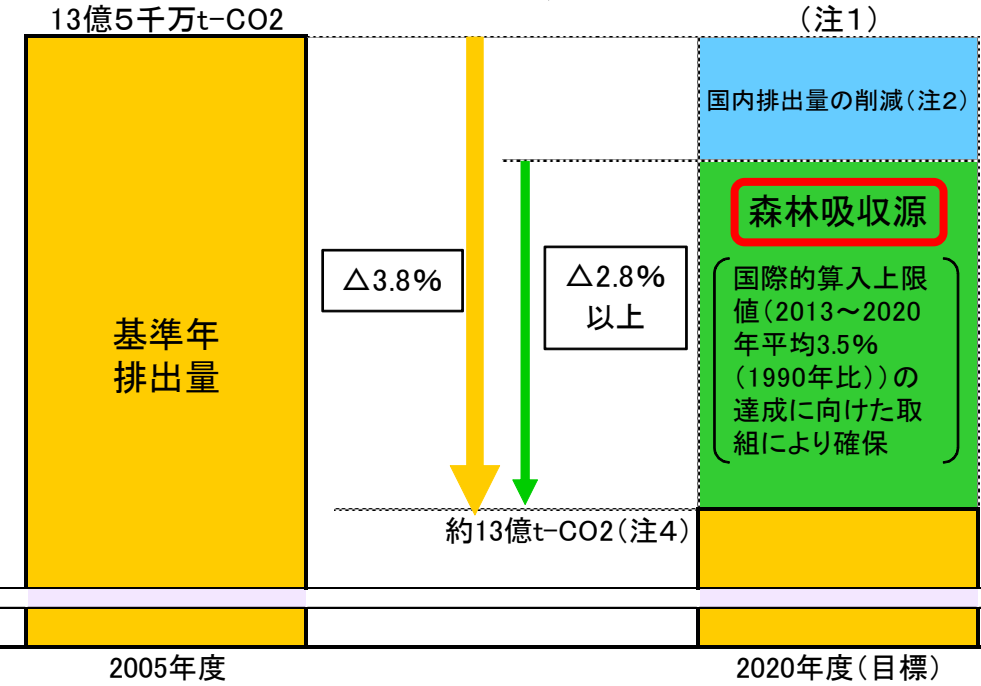
中層・大規模木造建築物の 普及に資する設計・評価法の開発

構造研究グループ
荒木 康弘

地球温暖化問題



2020年度における日本の 温室効果ガス排出削減目標



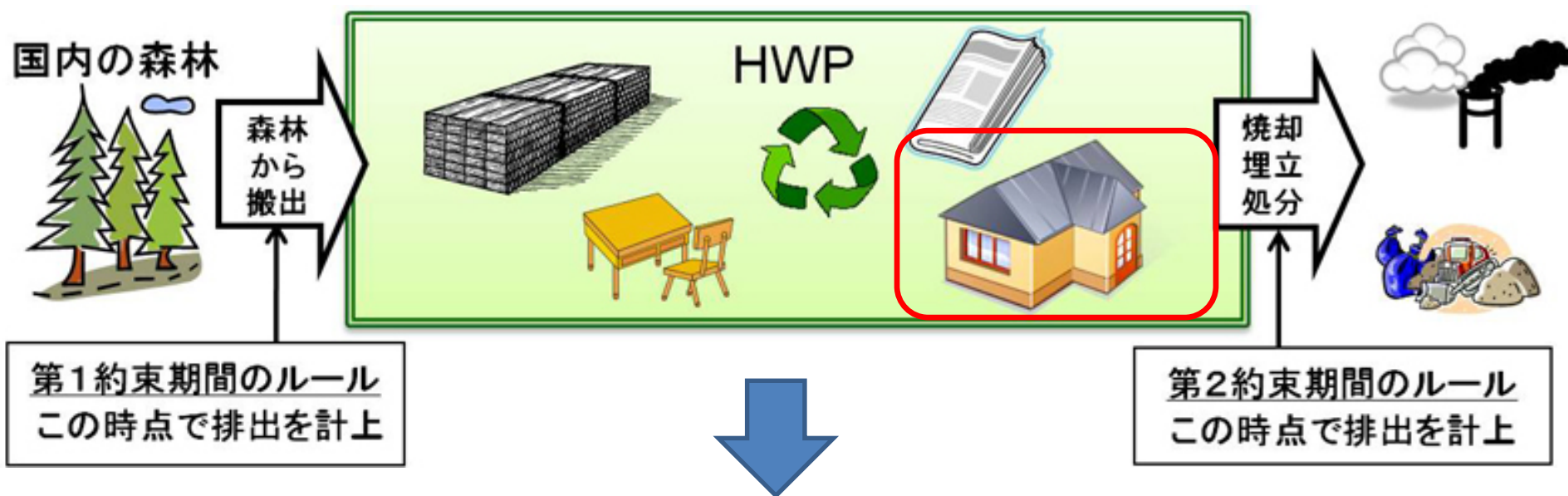
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/26hakusyo_h/all/a22.html

温室効果ガスの削減が地球規模で必要



COP17(第17回 気候変動枠組条約締約国会議:H23)


第2約束期間:**住宅等の木材**に貯蔵されている炭素量の変化を
(2013~2018) 温室効果ガス吸収・排出量として計上可能



温室効果ガス削減に、**木材の利用が貢献**
木材利用促進の一つ: 木造の中層・大規模化

http://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/20141117_topics5.html

木造建築物の中層・大規模における課題(H23当初)

材料	構造	防火
<p>海外で中層・大規模木造建築物の構造材として使用されるロスラミネーテッドティンバー (CLT)や単板積層板 (LVB)等の新木質構造材料に対する材料認定の枠組・材料強度が整備されていない</p>	<p>①中層木造建築物の構造設計のための設計技術が整備されていない ②中層木造建築物の設計に関連する規基準が明確ではない</p> 	<p>①木造建築物の高さ・規模に関する防火上制限に関する知見が整備されていない ②中層・大規模木造建築物の防火設計法(スプリンクラー、燃えしろ設計)の知見が整備されていない ③木質系部材の防・耐火性能を評価するための試験法</p>

重点研究課題「木材の利用促進に資する中層・大規模木造建築物の設計・評価技術の開発」(H23～25)

重点研究課題「CLT等を構造材とする木造建築物の普及促進に資する設計法の開発」(H26～27)

B 裡 LVL



Forte (10F, Melbourne)



講演内容

1. 材料分野の取り組み

- CLTの材料強度の考え方の紹介

2. 構造分野の取り組み

- CLT工法の概要の紹介

- 集成材構造に関する検討の紹介

- 枠組壁工法に関する検討の紹介

- 木質混構造建築物に関する検討の紹介

3. 防火分野の取り組み(概要)

4. 炭素収支の評価に関する検討の紹介

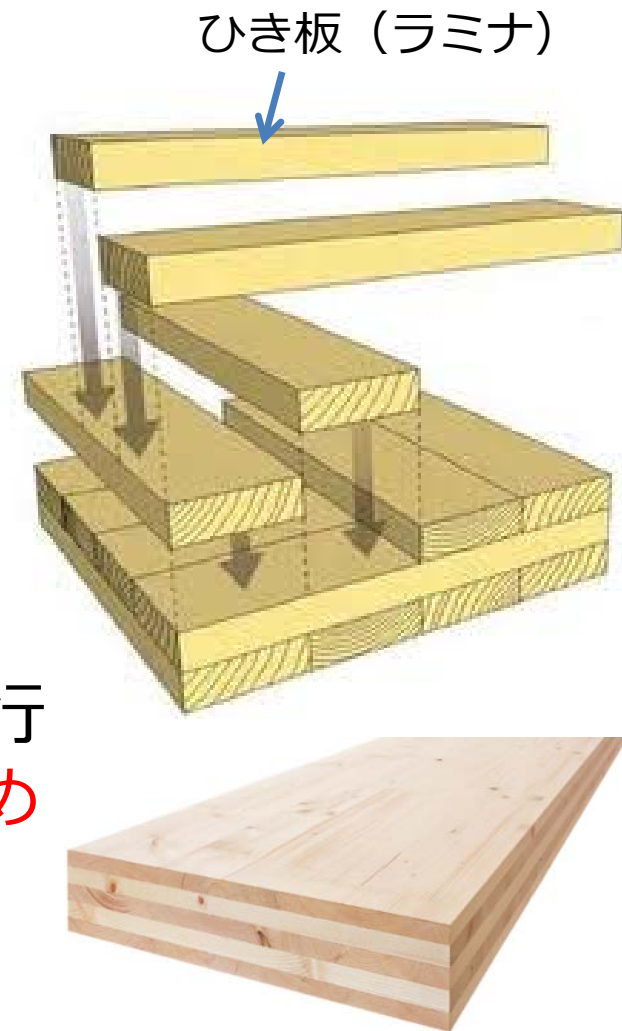
5. 今後の展望

CLT (Cross Laminated Timber)

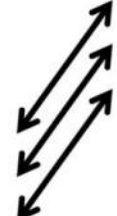
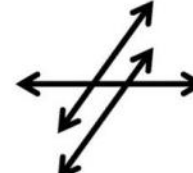
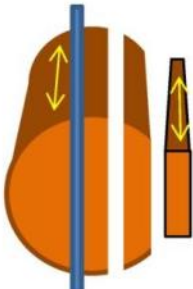
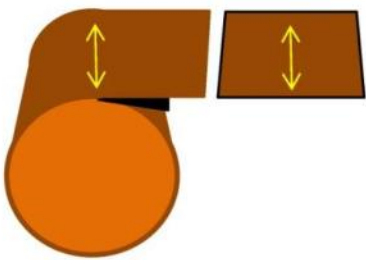
- ひき板の層を各層で互いに直交するように積層接着したパネル及び工法
- **1996年に欧州で開発**され、海外では6～10階建のマンション、中・大規模商業施設・公共施設、一般住宅等様々な建築物で使用
- CLTの日本農林規格が2014年1月に施行
⇒ **CLT工法を一般的な方法で設計するためには、材料強度等を定める必要**



森林総合研究所等の関係機関と協力して検討



CLTの特徴

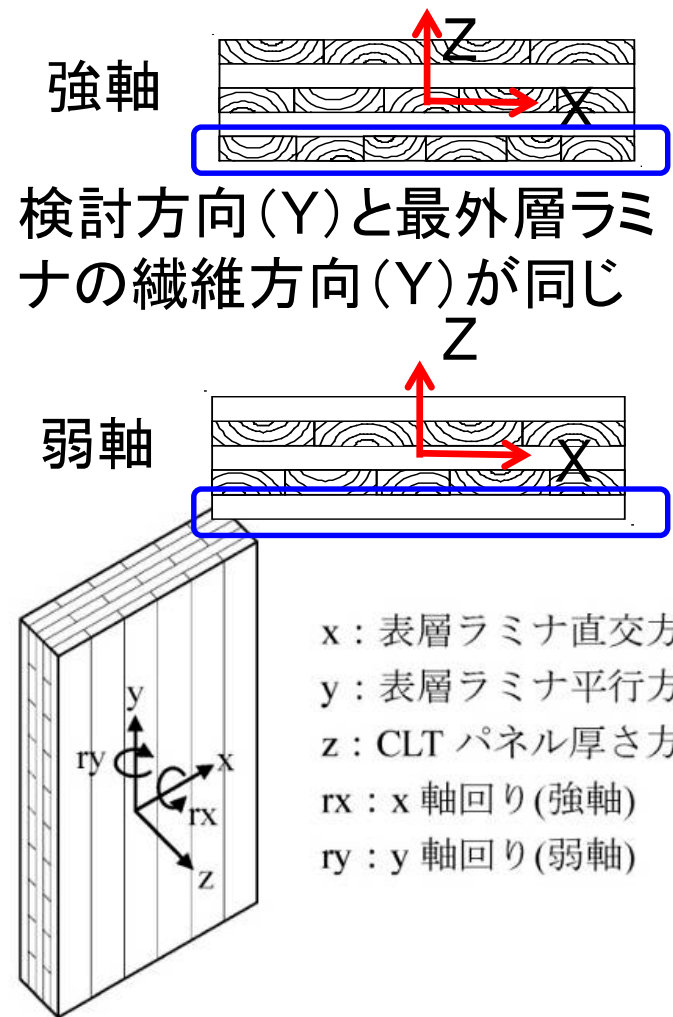
<p>原料</p> <p>繊維配向</p>	<p>平行</p> 	<p>直交</p> 
<p>ひき板</p> 	<p>集成材</p>	<p>CLT</p>
<p>単板</p> 	<p>LVL</p>	<p>合板</p>

(独)森林総合研究所 宮武チーム長作成

構造計算に必要な各方向の 材料特性値と算定方法

例: 5層5プライ

方向	応力	算定方法	
x	圧縮(最外層弱軸)	<p style="text-align: center;">等価断面法 (合板・集成材で用いられている理論)</p>	
x	引張(最外層弱軸)		
y	圧縮(最外層強軸)		
y	引張(最外層強軸)		
rz	面内曲げ(強軸)		
rz	面内曲げ(弱軸)		
rx	面外曲げ(強軸)		
ry	面外曲げ(弱軸)		
xz	面外せん断(強軸)		
yz	面外せん断(弱軸)		
xy	面内せん断		幅はぎ接着されていないCLTの接着層の変形を考慮したせん断強度算定式



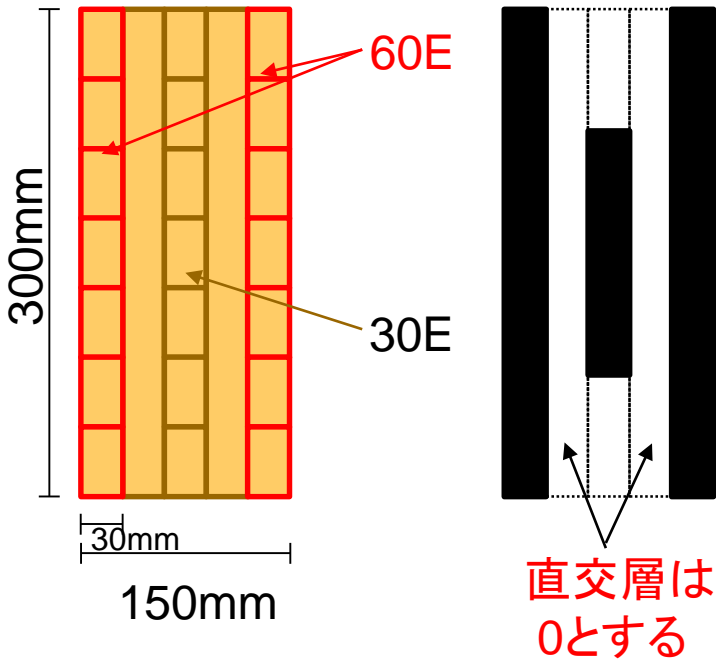
計算式の例(圧縮・面外曲げ)

応力	強軸・弱軸	計算式
圧縮	強軸	$F_c = \sigma_{c_oml} \frac{A_A}{A_O} k_{5th}$ <p> σ_{c_oml} : 最外層ラミナの圧縮強度 (N/mm²) A_A : 等価断面の断面積 (mm²) $A_A = \Sigma(E_i A_i) / E_0$ より算定 (図2)。 E_i は i 層ラミナの弾性係数、 A_i は i 層の断面積。 A_0 は最外層のラミナの弾性係数)。直交層弾性係数は0。 A_0 : 実断面の断面積 (mm²) k_{5th} : 95%下側許容限界値算出係数 (3/4) </p>
	弱軸	
面外曲げ (積層方向)	強軸	$F_{b0} = \sigma_{b_oml} \frac{I_{vA}}{I_{v0}} k_b k_{5th}$ <p> σ_{b_oml} : 最外層ラミナの曲げ強度 (N/mm²) I_{vA} : 等価断面の I (mm⁴) $I_{vA} = \Sigma(E_i I_i + E_i A_i Z_i^2) / E_0$ により算定 (E_i は i 層ラミナの弾性係数、 I_i は i 層の断面二次モーメント、 A_i は i 層の断面積、 Z_i は全層一体時の中立軸と i 層ラミナ重心の距離、 E_0 は最外層ラミナの弾性係数)。直交層の弾性係数は0。 I_{v0} : 実断面の断面二次モーメント (mm⁴) k_b : 面外曲げ強度調整係数 (0.65) k_{5th} : 95%下側許容限界値算出係数 (3/4) </p>
	弱軸	

CLT各方向の応力と算定方法の例1

圧縮強度の計算例(最外層強軸)

■ Mx60 5層5プライ



① 外層ラミナ強度圧縮強度 $\sigma_{c_oml} \times k_{5th}$
 等級M60A $\Rightarrow 16.2 \text{ N/mm}^2$ (下限値)

② 実断面 $A_0: 300 \times 150 = 45,000 \text{ mm}^2$

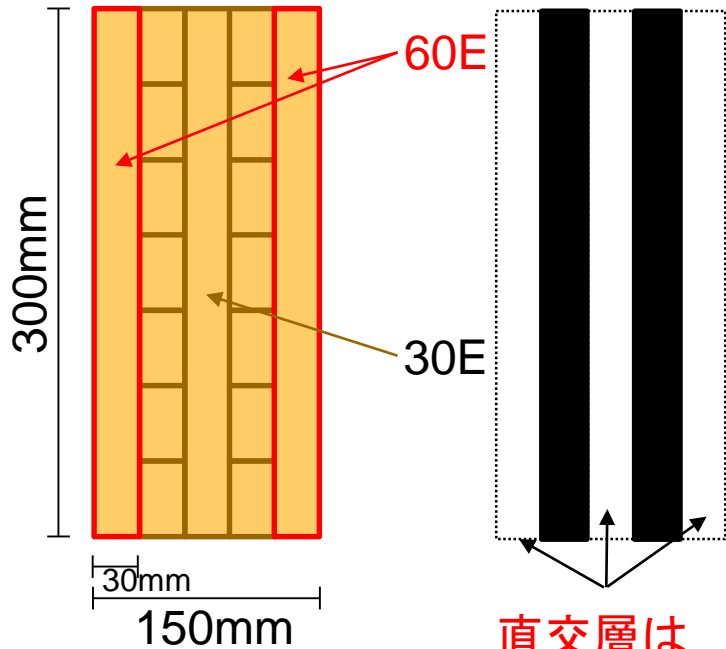
③ 等価断面 A_A :
 $60\text{E}/60\text{E} \times 300 \times 30 \times 2$
 $+ 30\text{E}/60\text{E} \times 300 \times 30 = 22,500 \text{ mm}^2$

$$F_c = \sigma_{c_oml} \frac{A_A}{A_0} k_{5th} = 16.2 \times 22,500 / 45,000 = 8.1 \text{ N/mm}^2$$

CLT各方向の応力と算定方法の例2

圧縮強度の計算例(最外層弱軸)

■ Mx60 5層5プライ



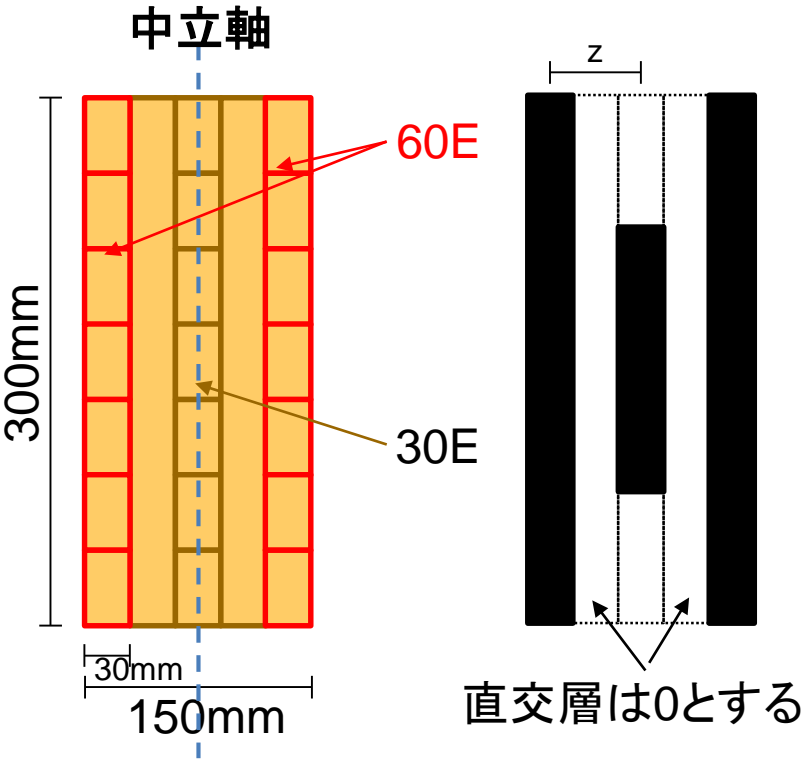
直交層は0とする

- ① 第2層ラミナ強度 $\sigma_{c_oml} \times k_{5th}$
等級M30A $\Rightarrow 11.6 \text{mm}^2$ (下限値)
- ② 実断面 $A_0: 300 \times 150 = 45,000 \text{mm}^2$
- ③ 等価断面 $A_A:$
 $30\text{E}/30\text{E} \times 300 \times 30 \times 2 = 18,000 \text{mm}^2$

$$F_c = \sigma_{c_oml} \frac{A_A}{A_0} k_{5th} = 11.6 \times 18,000 / 45,000 = 4.64 \text{N/mm}^2$$

CLT各方向の応力と算定方法の例3

面外曲げ強度の計算例(最外層強軸) ■ Mx60 5層5プライ



①外層ラミナ強度 $\sigma_{b_oml} \times k_{5th}$
 等級M60A \Rightarrow 20.0 (下限値)

②実断面の断面二次モーメント I_0 :
 $300 \times 150^3 / 12 = 84,375,000 \text{mm}^4$

③等価断面の断面二次モーメント I_A :

$$\frac{\sum(E_i I_i + E_i A_i z_i^2)}{E_0}$$

$$= \frac{60E \frac{300 \times 30^3}{12} + 60E \times 300 \times 30 \times 60^2}{60E} \times 2$$

$$+ \frac{30E \frac{300 \times 30^3}{12} + 30E \times 300 \times 30 \times 0^2}{60E}$$

$$= 66,150,000 + 337,500 = 66,487,500 \text{mm}^4$$

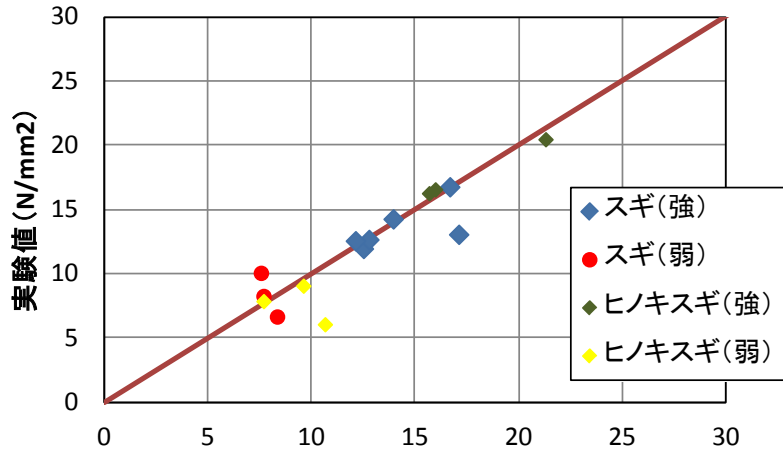
$$F_{b0} = \sigma_{b_oml} \frac{I_{vA}}{I_{v0}} k_b k_{5th} = 20.0 \times 66,487,500 / 84,375,000 \times 0.65 = 10.2$$



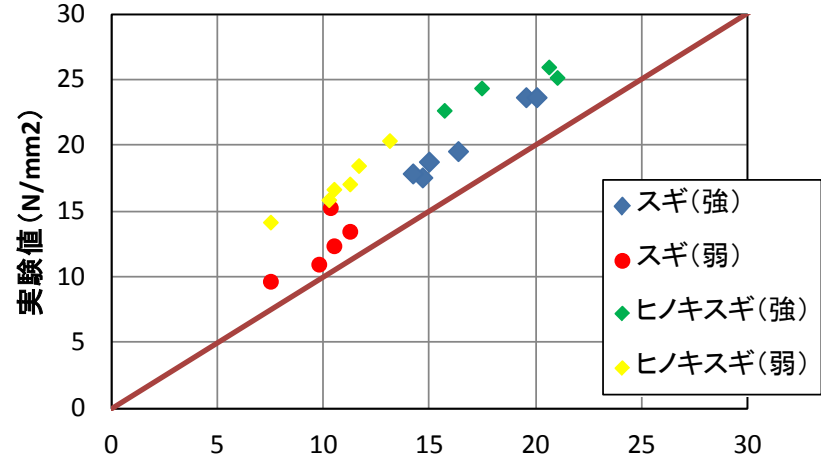
実験値と計算値の比較(平均値同士)

(基準となる数値は更にバラツキ係数を考慮)

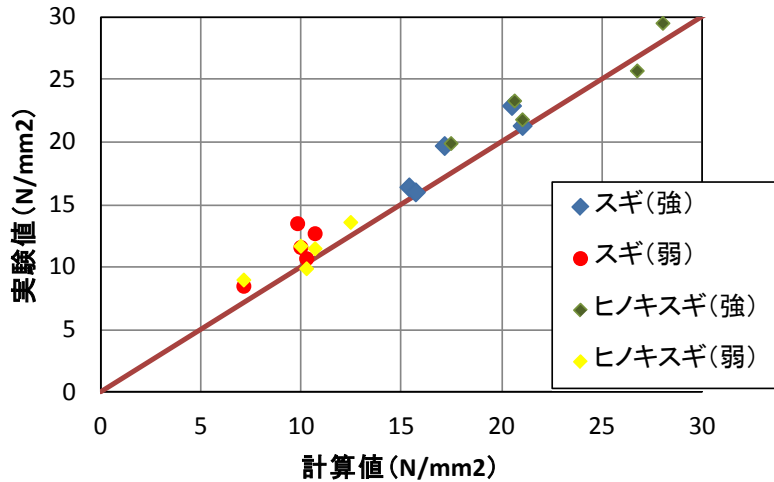
引張



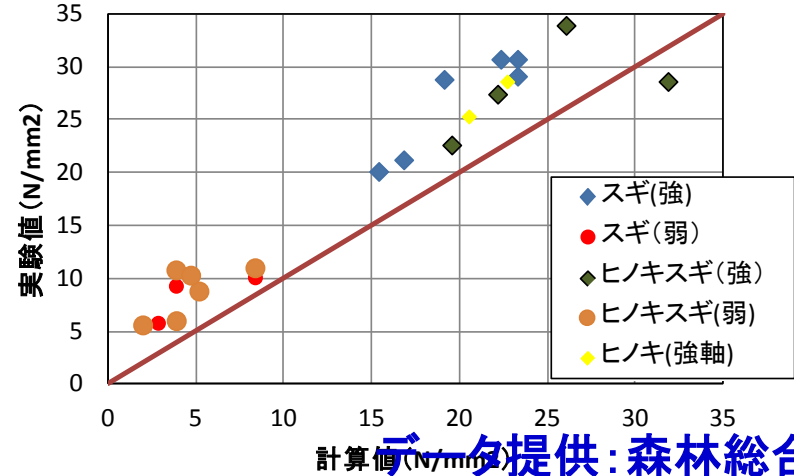
圧縮



計算値 (N/mm2)
面内曲げ



計算値 (N/mm2)
面外曲げ



データ提供: 森林総合研究所

直交層を考慮する場合



直交層のEを平行層のEの1/30とする (CLT HandBook)

Q. 直交層の考慮/非考慮でどれ位異なる？

(圧縮) ① 1~2% ② 5~6% ③ 10%

(面外曲げ) ① 1% ② 5% ③ 10%

直交層：最外層の1/30のヤング係数として計算してみましよう

講演内容

1. 材料分野の取り組み

- CLTの材料強度の考え方の紹介

2. 構造分野の取り組み

- CLT工法の概要の紹介
- 集成材構造に関する検討の紹介
- 枠組壁工法に関する検討の紹介
- 木質混構造建築物に関する検討の紹介

3. 防火分野の取り組み(概要)

4. 炭素収支の評価に関する検討の紹介

5. 今後の展望

Cross Laminated Timber (CLT)製造・施工



- 大きなパネル形状の製品を工場生産
- 工場で生産した壁パネル、床パネル、屋根パネル等を現場に搬入し、組み立てる。一種のプレファブ
- パネル間は、長ビス、金物+ビス、ホールダウン金物、タイダウン金物等で接合

海外の事例



国内の事例



CLTの普及に向けたロードマップ

林野庁・国土交通省

目標	現状	26年度	27年度	28年度	目指す成果
CLT工法での建築を可能に (※)壁、床等の構造の全てをCLTとする建築物	国土交通大臣の認定を受けて建設。	強度データ収集		基準強度告示 追加データ収集	・国土交通大臣認定を受けず、比較的容易な計算により建設可能に
	規模等に応じた耐火性能を確保することで建設。	一般的な設計法を確立するための検討・実大実験		一般的な設計法告示(注1)	
		「燃えしろ」に係る検討・実験等	燃えしろ設計(注2)告示		

パブリックコメント

(注1)許容応力度計算等一般的に使われる比較的簡易な構造計算による設計手法。

CLTを用いた木造建築基準の高度化推進事業の 事業主体との共同研究で検討

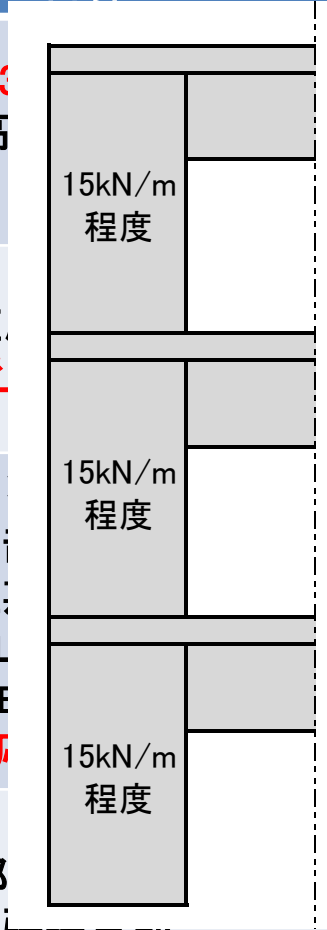


CLT工法: 3つの構造形式

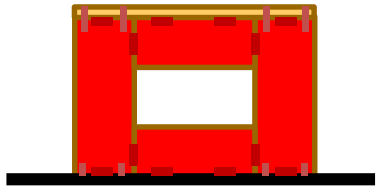
	小幅パネル工法	大版パネル工法1	大版パネル工法2
	<p>垂れ壁パネル 無開口壁パネル 腰壁パネル</p>	<p>垂れ壁部分 無開口壁部分 腰壁部分</p>	<p>垂れ壁部分 無開口壁部分 腰壁部分</p>
構面の構成	<p>無開口壁・垂れ壁・腰壁パネルで構成 無開口壁の上下4隅に引張金物 無開口壁・垂れ壁・腰壁パネル相互を接合金物等で緊結</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・有開口/無開口大版パネルで構成 ・無開口壁部分の4隅に引張金物 	<ul style="list-style-type: none"> ・有開口/無開口大版パネルで構成 ・構面の4隅に引張金物を配置
計算ルート	ルート1以上		ルート2以上
特徴	変形性能の高い架構		小幅・大版1より変形性能は低い

CLT工法の規模と構造計算ルート

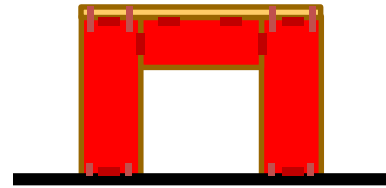
	限界耐力計算	保有水平耐力計算	許容応力度等計算	許容応力度計算
規模	<p>60m以下*1</p> <p>*1 防火上:4階建が限界(1時間耐火告示)</p>		高	<p>3階以下、高さ13m以下、軒高9m以下</p>
1次設計	<p>損傷限界耐力Q_d</p> <p>損傷限界変形角γ_dの検定</p>	<p>部材・接合部の存在</p> <p>短期許容応力度を超え</p>		<p>短期:無開口壁</p> <p>15kN/m程度として計算</p> <p>長期:床、壁等の検定</p>
2次設計	<p>安全限界耐力Q_s</p> <p>安全限界変形角γ_sの検定</p>	$Q_u \geq Q_{un}$ $(\text{= } A_i \cdot F_{es} \cdot R_t \cdot Z \cdot D_s \cdot \sum w_i)$	<p>Pa</p> <p>Pa:</p> <p>短:</p> <p>FL</p> <p>FE</p> <p>Rf:</p>	<p>仕様規定に従い省略</p> <p>①階高、</p> <p>②腰壁・垂れ壁</p> <p>高さ・長さ</p> <p>③無開口壁長</p> <p>④接合部仕様</p>
備考	<p>Fh:</p> <p>建告1457号に基づき算出</p> <p>($\gamma_1=0.2$)</p>	<p>Ds:</p> <p>①CLT工法、</p> <p>②壁パネルサイズ、</p> <p>③仕様規定で異なる</p>	<p>①CLT部</p> <p>②その他の引張・せん断接合部で異なる</p>	



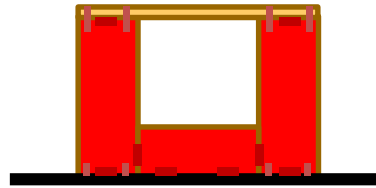
ルート1以上、ルート2以上で可能な架構



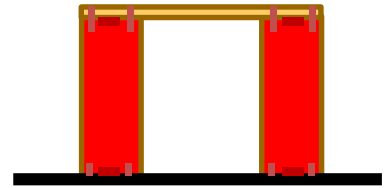
(1-1) 垂れ壁・腰壁有り



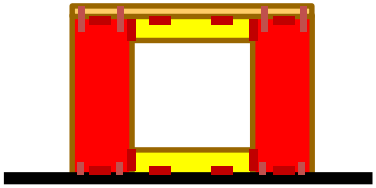
(1-2) 垂れ壁のみ



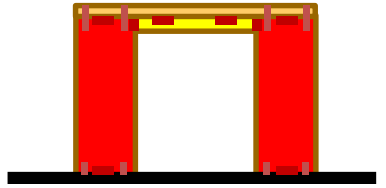
(1-3) 腰壁のみ



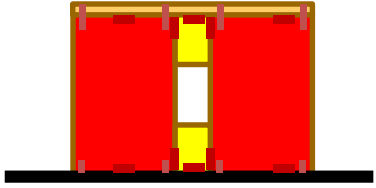
(1-4) 垂れ壁・腰壁無し



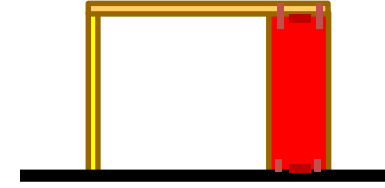
(2) 垂れ壁・腰壁(高さ不足)有り



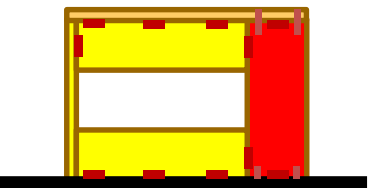
(3) 垂れ壁の代わりに梁



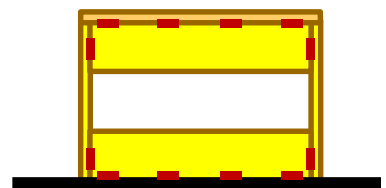
(4) 垂れ壁・腰壁(幅不足)有り



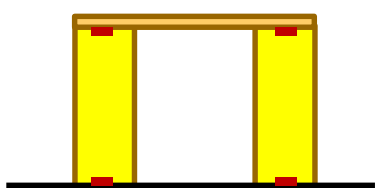
(5) 耐力壁が片側のみ



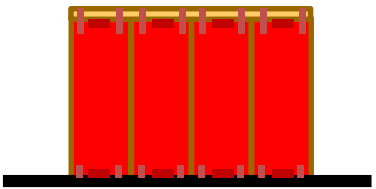
(6) 垂れ壁の片側を直交壁で支持



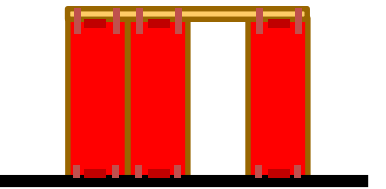
(8) 垂れ壁の両側を直交壁により支持



(1-4) 垂れ壁・腰壁無し
(無開口壁は鉛直支持のみ)



(10-1) 連続壁 ○



(10-2) 連続壁(スリット入り)

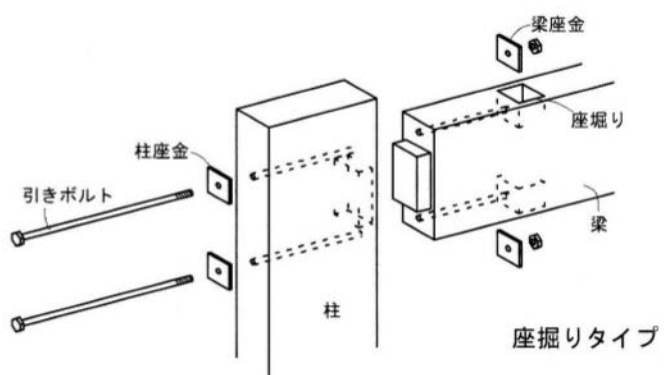


(11-1) 大版壁(幅が2m以上)
ルート2以上

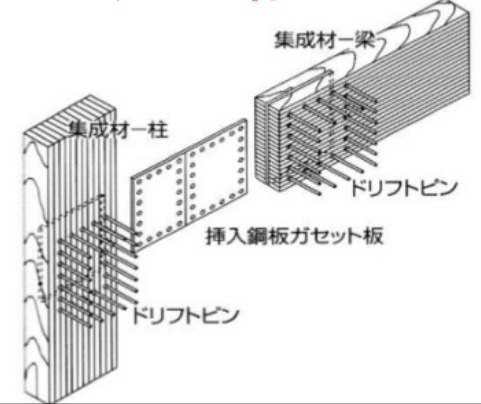
- *ルート1:
 ①階高、
 ②腰壁・垂れ壁
 高さ・長さ
 ③無開口壁長
 ④接合部仕様
 の制限有り

集成材構造に関する検討

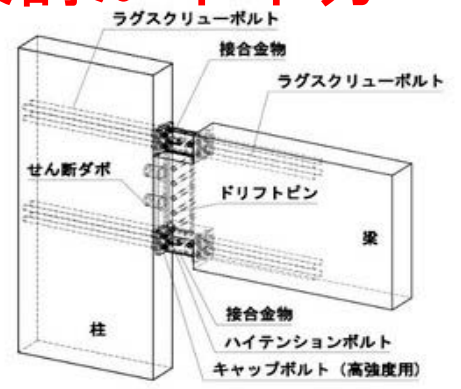
多様な架構・接合形式。中高層化には大地震時の安全性確保のために重要な**崩壊機構に関する検討が不十分**



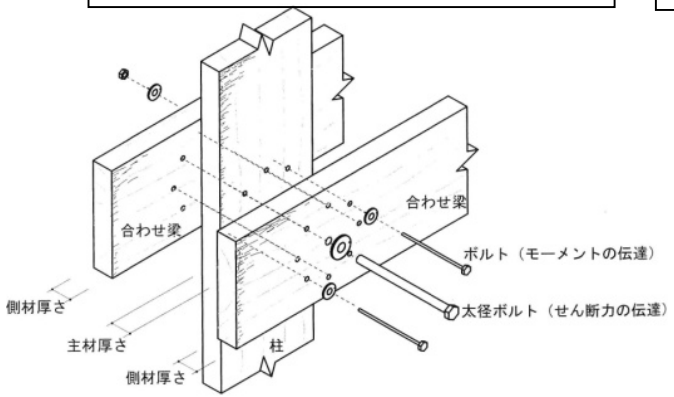
引きボルト式接合



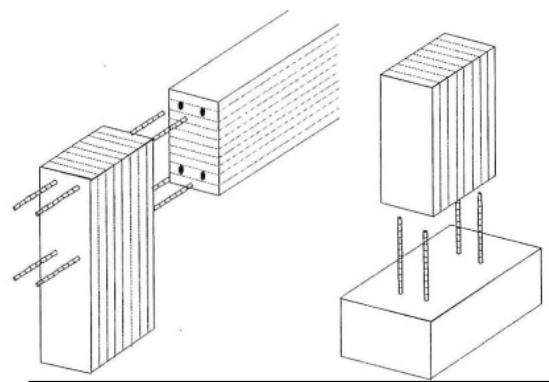
鋼板挿入ドリフトピン接合



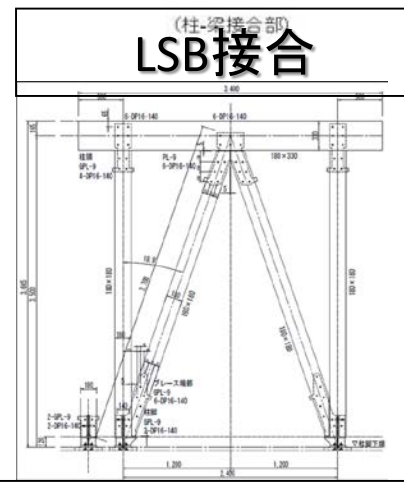
LSB接合



合わせ梁接合



GIR接合



ブレース構造



集成材構造に関する検討

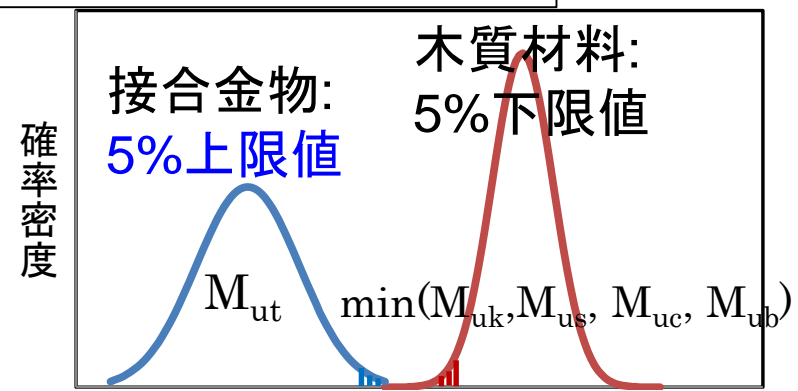
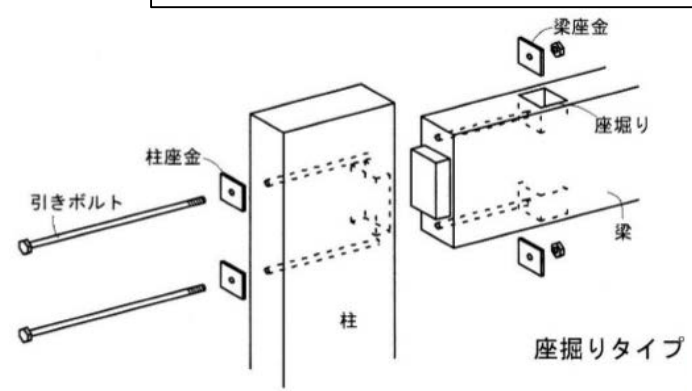
集成材構造接合部の靱性保証設計の提案

<引きボルト式接合の例>

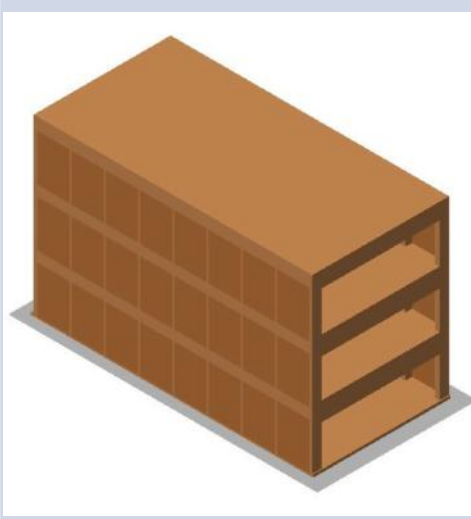
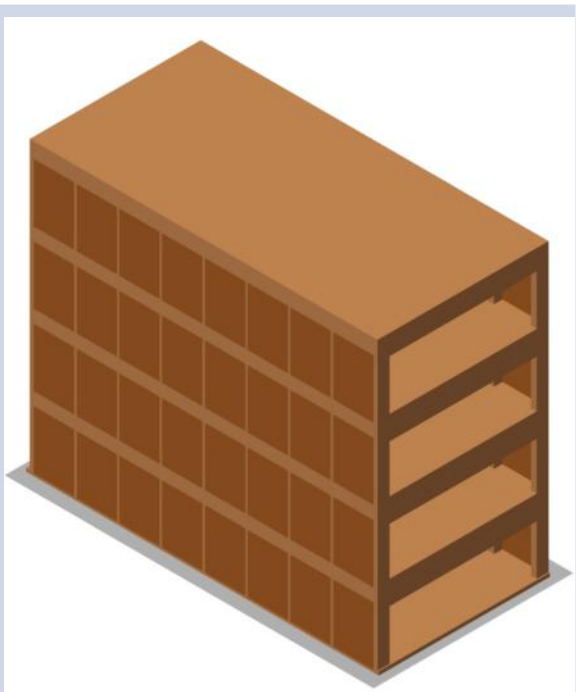
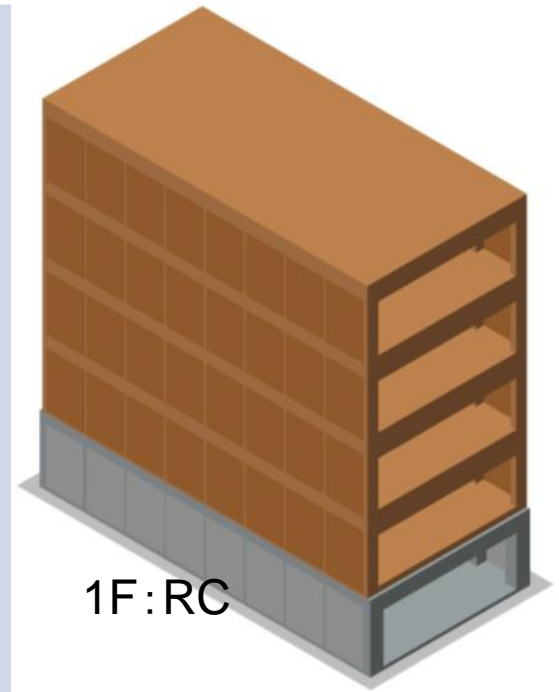
想定される5つの破壊モード

- ① M_{ut} **引きボルトの引張破壊**
- ② M_{us} **座金から梁木口へのせん断破壊**
- ③ M_{uk} **梁座金の繊維方向圧縮による木部降伏**
- ④ M_{uc} **柱の曲げ破壊**
- ⑤ M_{ub} **梁の曲げ破壊**

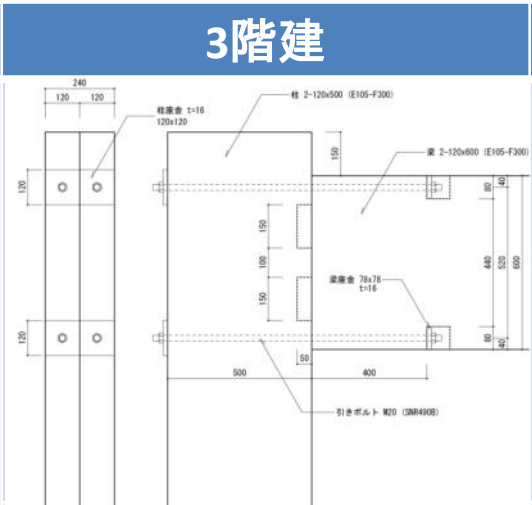
$$M_{ut} \leq \min(M_{uk}, M_{us}, M_{uc}, M_{ub})$$



接合部靱性保証設計を用いた集成材構造試設計

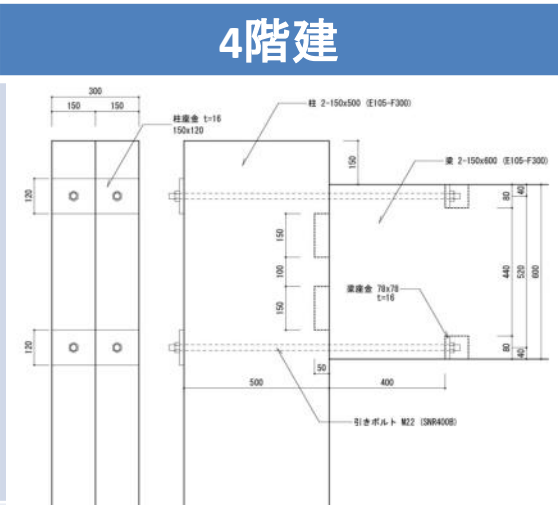
		3階建(45分準耐火)	4階建(1時間耐火)	5階建(W部分:1時間耐火)
				
規模		平面:7.2m×14.4m、階高3.1m		
耐震	長	構造用合板耐力壁		
要素	短	引きボルト式接合集成材フレーム		

3階建



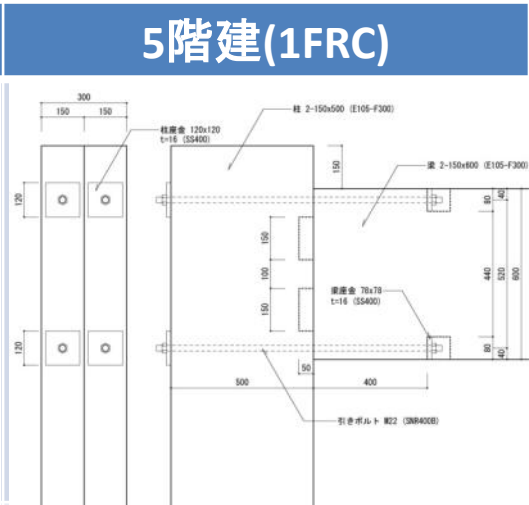
柱:2-120×500
 梁:2-120×600
 ボルト:M20(SNR490B)

4階建



柱:2-150×500
 梁:2-150×600
 ボルト:M22(SNR400B)

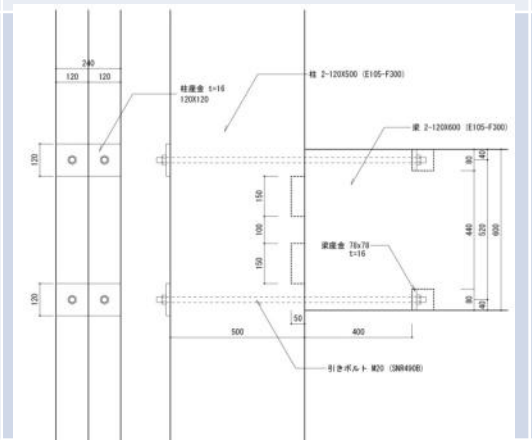
5階建(1FRC)



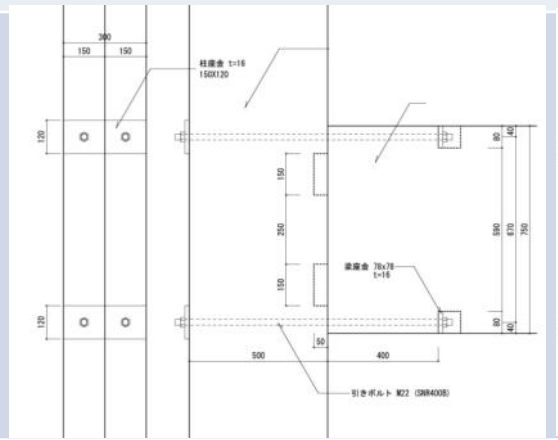
柱:2-150×500
 梁:2-150×600
 ボルト:M22(SNR400B)

最上階柱梁

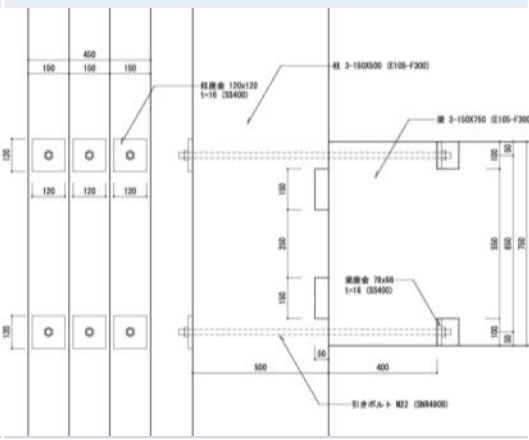
3階建



柱:2-120×500
 梁:2-120×600
 ボルト:M20(SNR490B)



柱:2-150×500
 梁:2-150×750
 ボルト:M22(SNR490B)



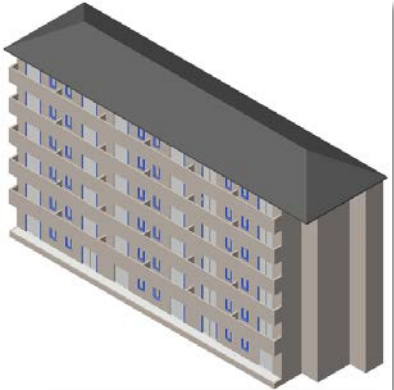
柱:3-150×500
 梁:3-150×750
 ボルト:M22(SNR490B)

規準階柱梁



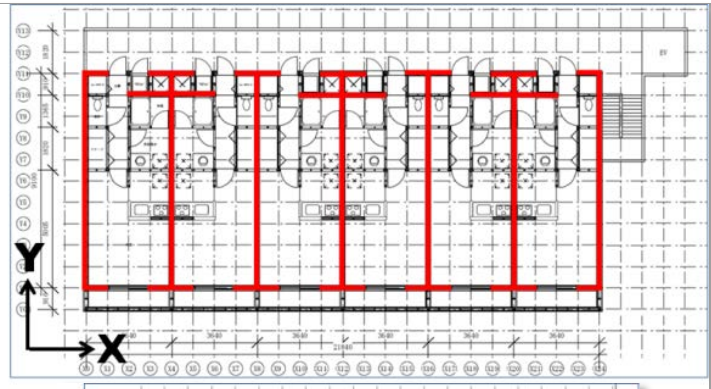
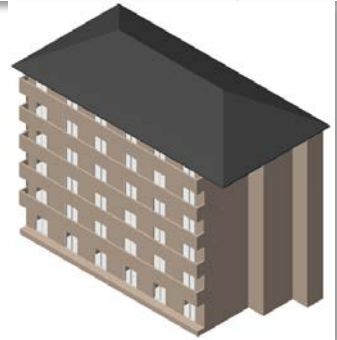
枠組壁工法に関する検討(日本ツーバイフォー協会と共同研究)

6階建モデルに作用する外力



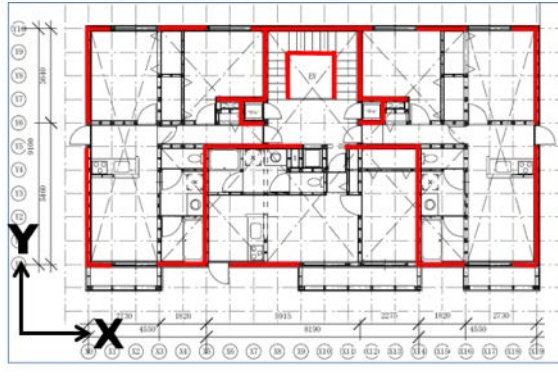
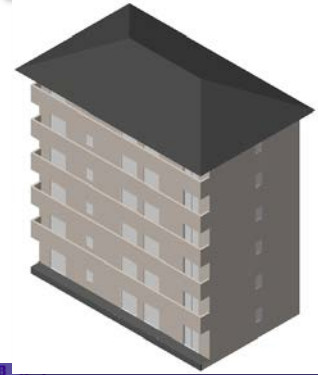
必要許容耐力：
27kN/m (14倍)

必要保有耐力：
48kN/m



必要許容耐力：
32kN/m (16倍)

必要保有耐力：
56kN/m



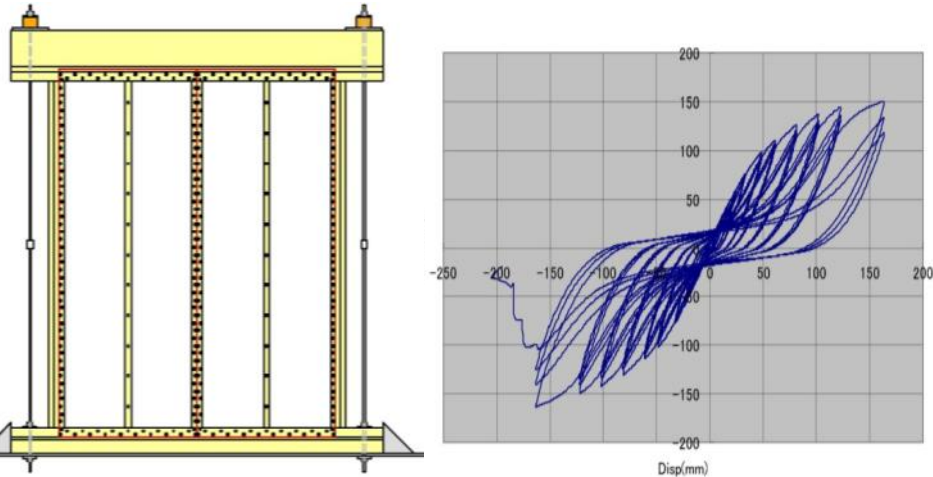
必要許容耐力：
26kN/m (13倍)

必要保有耐力：
45kN/m



6階建実現に必要な設計技術の開発1

高強度耐力壁に関する設計技術

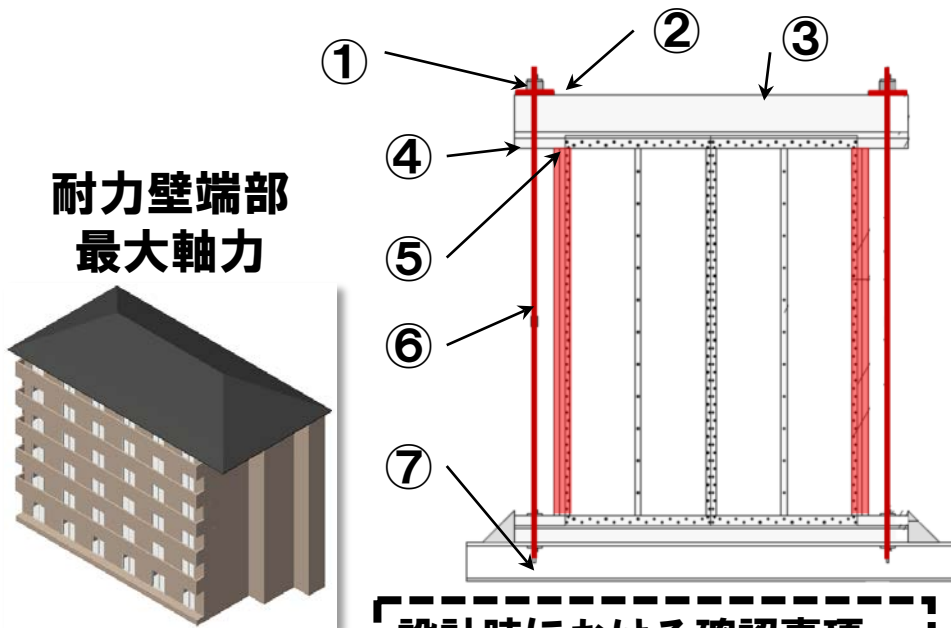


枠材	上下・縦枠 : D.Fir-L甲種2級306
面材	カラマツ構造用合板2級 12mm厚、両面張り
釘接合部	外周 : CN75@50mm千鳥 中間 : : CN75@200mm

$P_{max} = 163.76\text{kN}$
 $\mu = 2.58$
 $D_s = 0.49$
 $P_u = 139.19\text{kN}$

壁耐力の算定		
P_y	51.62	kN
$P_u \cdot 0.2 \cdot \sqrt{2\mu - 1}$	32.14	kN
$(2/3)P_{max}$	59.98	kN
$P_{1/150}$	37.91	kN
P_a	32.1	kN
相当壁倍率	16.4	

タイダウン接合に関する設計技術



耐力壁端部
最大軸力

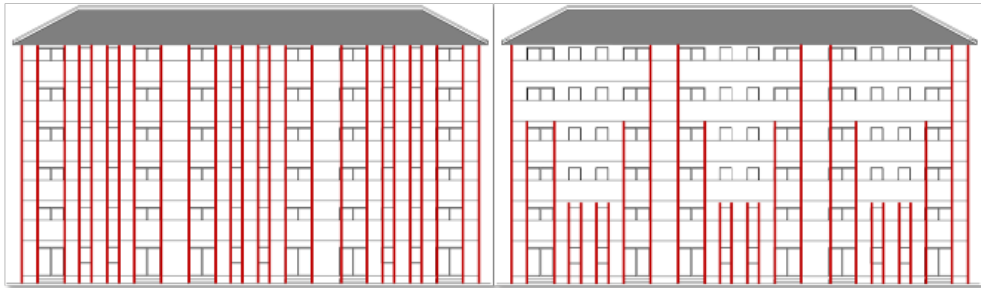
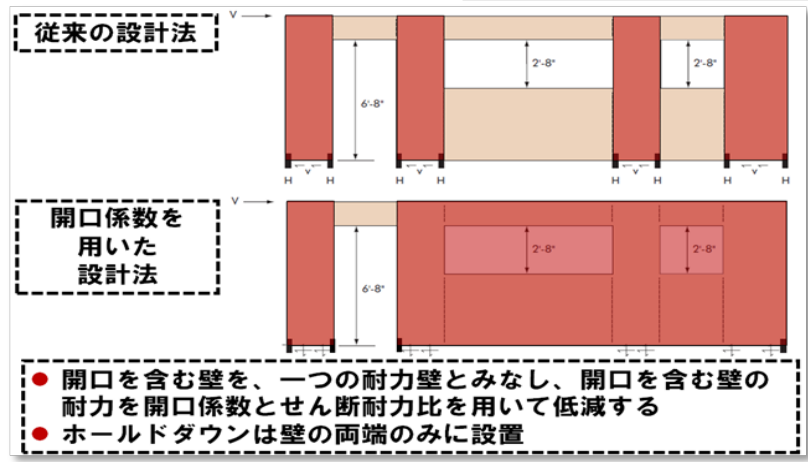
許容 : 364kN
 保有 : 638kN

- 設計時における確認事項**
- ① ボルトネジナット部
 - ② 座金の曲げ
 - ③ 木材のめり込み
 - ④ 枠材の曲げ
 - ⑤ 枠材のめり込み
 - ⑥ タイダウンの引張
 - ⑦ タイダウンアンカー部分



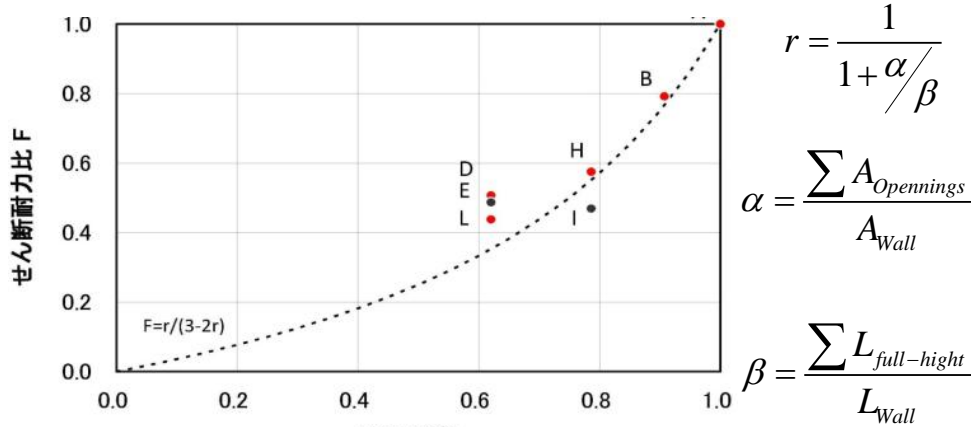
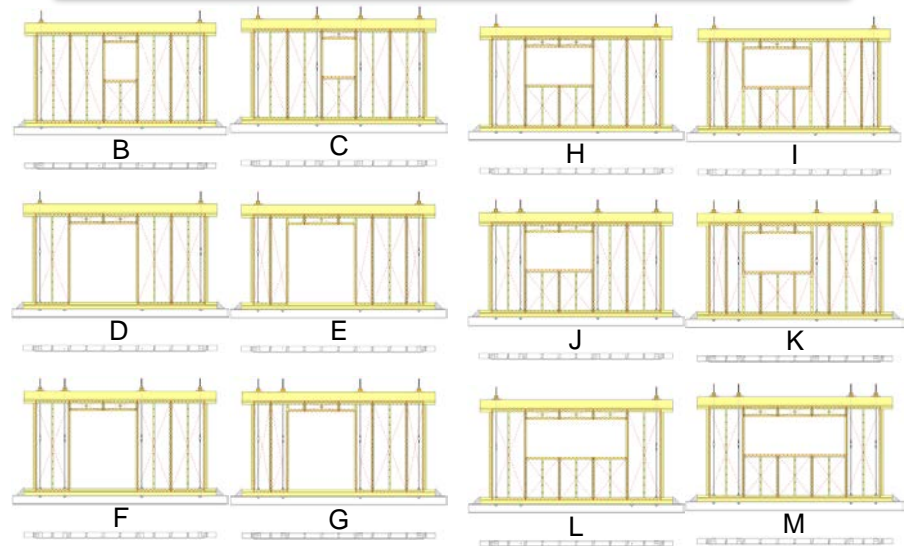
6階建実現に必要な設計技術の開発2

開口低減係数に関する検討



耐力壁両側に金物設置

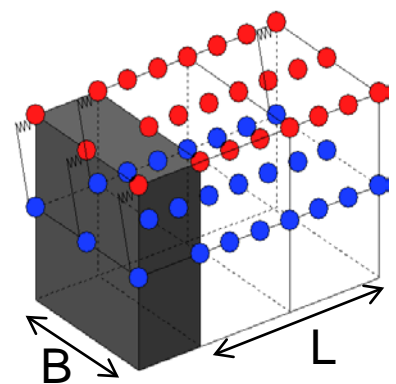
開口係数適用時



- A_{Wall} : 有開口耐力壁の全面積(開口部も含む)
- $A_{Openings}$: 有開口耐力壁の開口部面積
- L_{Wall} : 有開口耐力壁の全長(開口部も含む)
- $L_{full-high}$: 有開口耐力壁に含まれる無開口壁の長さ



平面混構造に関する検討



<平面混構造の構造設計方法案>

- ① RC造コア部分の設計方法
- ② ねじれに十分抵抗できる構造とするためのRC造部分の規定
- ③ 水平構面に一様な性能を持たせるための規定
- ④ 木造部分の鉛直構面耐力要素に対する、RC造と木造部分のアスペクト比、重量比に関する規定
- ⑤ 振れがほぼ無視できる構造の場合の部材・接合部の検定方法

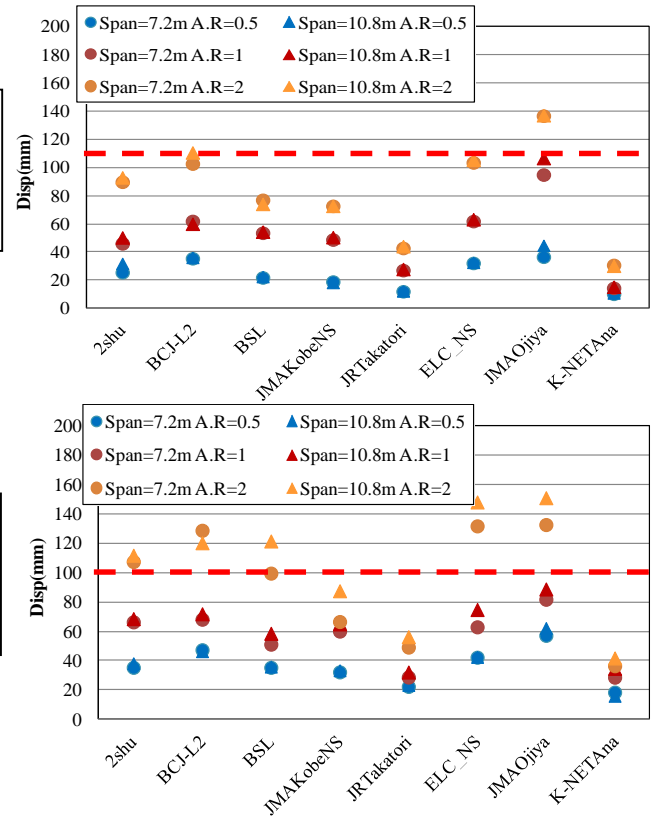
RC部分
ルート1

RC部分
ルート3

一層については検討済み

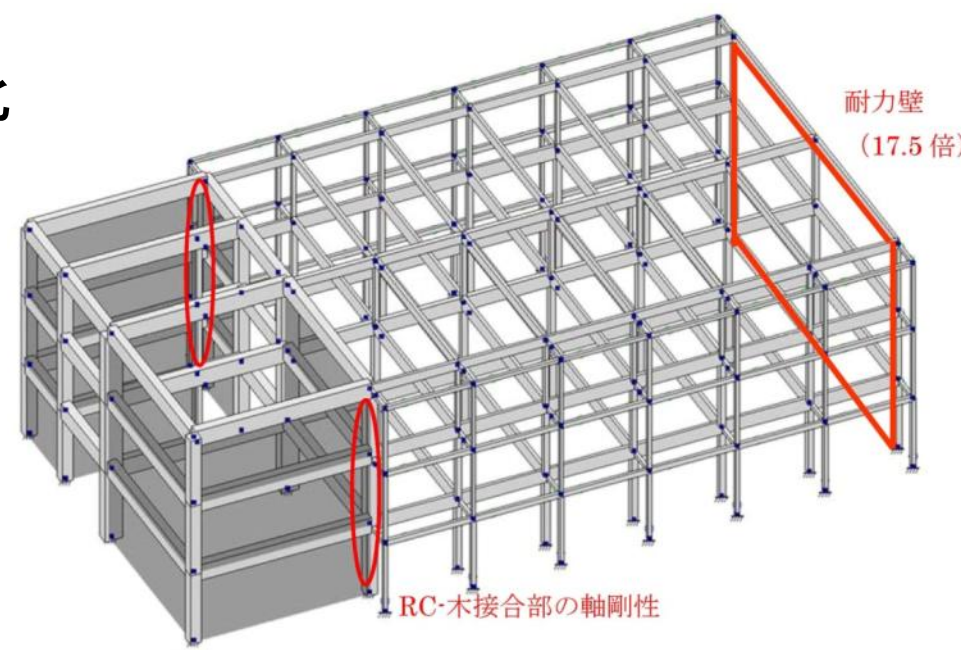
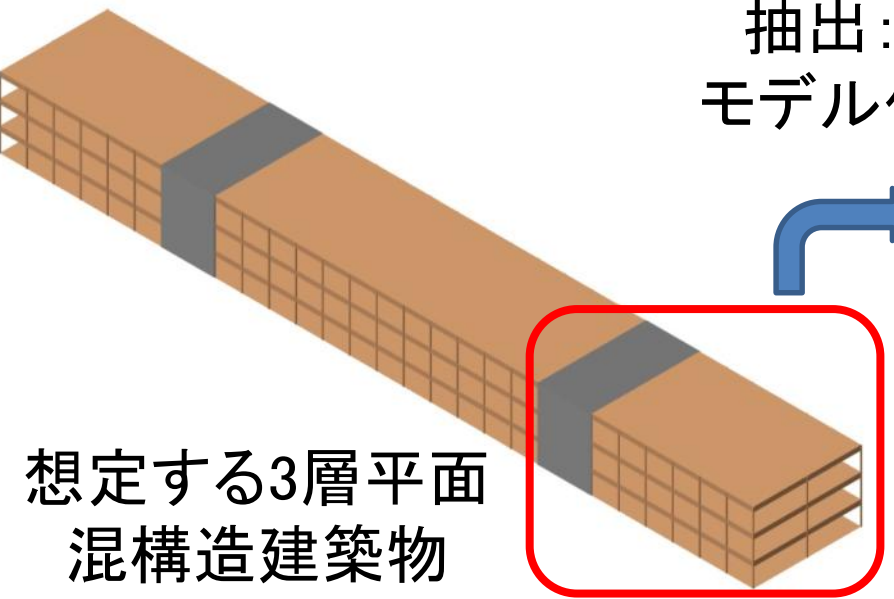


多層について検討



平面混構造の構造設計方法の妥当性検証

抽出：
モデル化

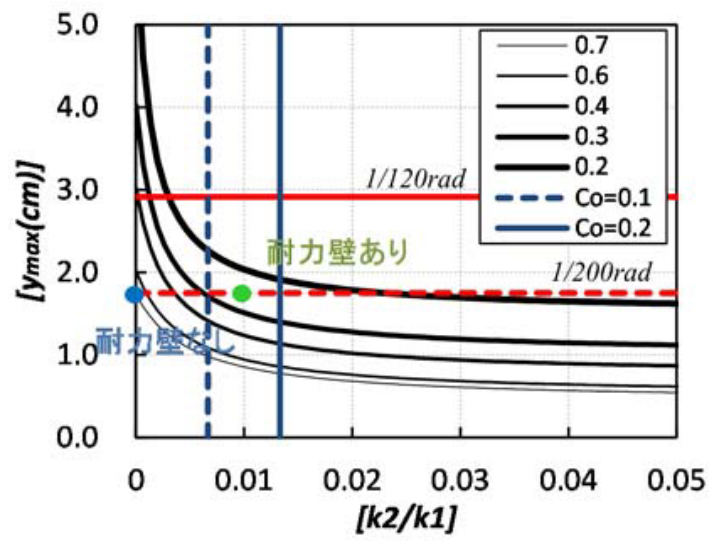


解析ケース

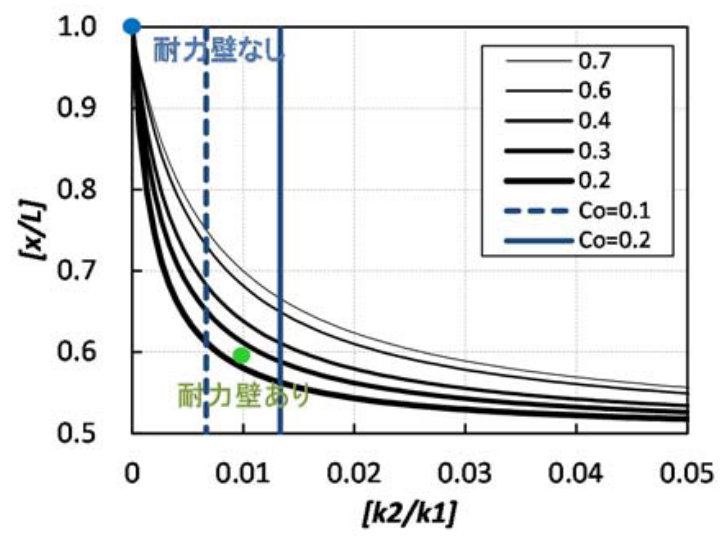
ケース名	X15耐力壁 (壁倍率17.5)	RC-木接合 軸バネ	層間変形角 クライテリア	木造部 水平構面 設計震度K	RC部負担 せん断力割合
Wn_K	×	○	1/200	$0.7 \times 1.25 = 0.875$	100%
Wn_Kn	×	×	1/200	$0.7 \times 1.25 = 0.875$	100%
W_Kn	○	×	1/200	$0.25 \times 1.25 = 0.313$	60%

平面混構造の構造設計方法の妥当性検証

② 層間変形角と水平震度(L=24m)



③ 負担割合と水平震度(L=24m)



最大層間変形角とRC部のせん断力負担割合

<計算の流れ>

- ① RC造コア部分設計
- ② 木造水平構面の設計(左図利用)
- ③ RCと木造部分の鉛直構面負担割合(右図利用)
- ④ 応力解析・接合部設計
- ⑤ 接合部を考慮した応力・変形計算

ケース名	X15 耐力壁	接合部 軸バネ	最大層間変形角 [rad]	RC部負担せん断力の割合 [-]
Wn_K	×	○	3F:1/290 (X15) 2F:1/331 (X15) 1F:1/185 (X15)	—
Wn_Kn	×	×	3F:1/295 (X15) 2F:1/443 (X15) 1F:1/239 (X15)	—
W_Kn	○	×	3F:1/453 (X14) 2F:1/424 (X14) 1F:1/277 (X14)	3F:63.3% 2F:65.4% 1F:65.4%



講演内容

1. 材料分野の取り組み

2. 構造分野の取り組み

3. 防火分野の取り組み

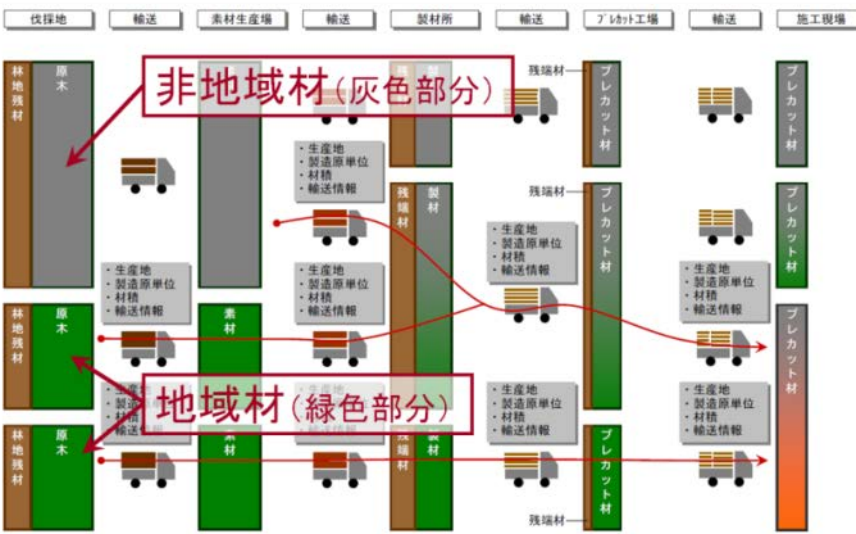
- 国内外の木造建築物の防火規制の考え方に関する検討
- 実建物の火災条件を考慮した耐火試験評価方法の検討
- LVL及びCLTの燃えしろ設計のための検討(基準整備促進事業の事業主体との共同研究で検討)
- 木造3階建学校の防火基準に関する検討(木造建築基準の高度化推進事業との共同研究で検討)

4. 炭素収支の評価に関する検討の紹介

5. 今後の展望

炭素収支の評価に関する検討

- 木造建物に使用される木材製品を対象とし、製品の製造と輸送に係るCO2排出量、製品原料に占める地域産原料と非地域産原料の内訳を、事業者が簡便に算出する手法とツールを開発・栃木県内の事業者で試行
- 中層木造建築物を構成する木材製品の炭素収支(製造・輸送に係るCO2排出量と木材製品の炭素固定量の差)の算定事例を作成



地域材と非地域材を評価する方法を提案

地域産材（栃木県内流通の製材品）の炭素収支（炭素固定量－炭素排出量）

約160kg-C/m³

延べ床面積約1500m²の6階建ての集合住宅の製材に関する炭素収支は約24ton-Cの炭素固定

炭素収支

施工現場名(部名)	470697H004
住所	栃木県塩谷郡高根沢町大字上高根沢
延床	36.0
階数	3.3
総木材投入量	39.53 m ³
炭素固定	35.88

この建物の炭素収支は、

23.68 CO2-ton です

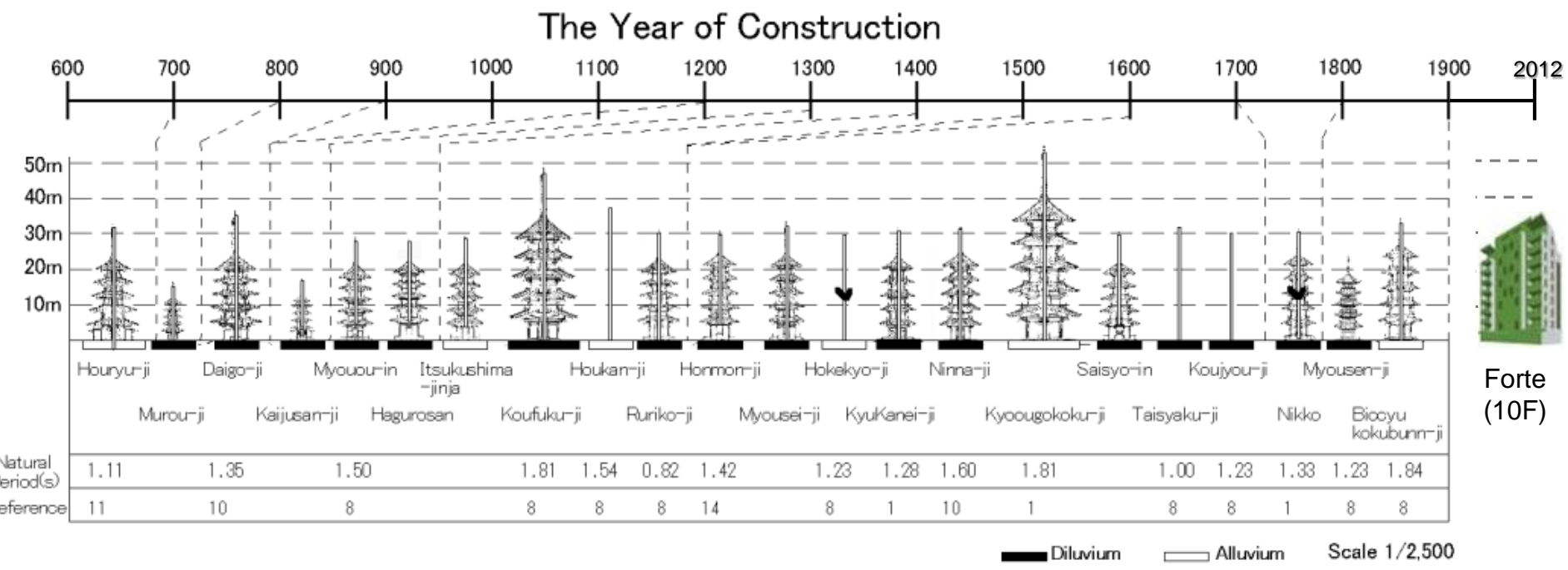
- ①炭素固定量 35.88 CO2-ton
- ②製造時CO2排出 9.06 CO2-ton
- ③輸送時CO2排出 3.14 CO2-ton

※ 炭素収支=①炭素固定量-(②製造時CO2排出+③輸送時CO2排出)

近年の中層・大規模木造建築に関する動向

年	関連法令	国内中層木造	海外中層木造
2010	公共建築物の木材の利用促進に関する法律	国内初4階建枠組壁工法建物 (2006)	Murray Grove (9F U.K., 2009)
2011		国内初4階建軸組工法建物	Bridport House (8F U.K., 2011)
2012		木造5階建集合住宅 (1F:RC)	Forte (10F, Melbourne)
2013		2×4 5階建店舗併用住宅 (1F:RC)	Via Cennia di Cambiamento (Milano, Italy, 05)
2014	<div style="border: 2px solid black; padding: 10px;"> <h2 style="margin: 0;">中層木造建築物のより一層の普及の検討</h2> <h2 style="margin: 0;">我が国での木造高層化の可能性</h2> </div>		
2015	に関する規定・木造耐火構造の例示仕様追加		Paradigm Place (10F U.K.)
2016	CLT材料・構造方法告示 (2016年早期)	5階建CLT建物(1F:RC) 6階建2×4実験建物	





日本の技術力を示す時

From: Earthquake Response Monitoring and Seismic Performance of Five Storied Timber Pagoda, Proceeding of the 13th WCEE, Paper, 2004

ご清聴ありがとうございました